Z-H

HARVARD UNIVERSITY.

LIBRARY

OF THE

MUSEUM OF COMPARATIVE ZOÖLOGY.

17,103

H. A. Hagen library.

April 8, 1902.

Digitized by Google

2

Ueber die

Theorie der zusammengesetzten Farben.

Physiologisch-optische Abhandlung,

wodurch

zu seiner am 28. Juni d. J. 11 Uhr Vorm. stattfindenden

Habilitation

als ordentlicher Professor der medicinischen Facultät
an der Universität zu Königsberg

ergebenst einladet

Dr. **H. Helmholtz.**

Druck von Gebr. Unger in Berlin.
1852.

Digitized by Google

MCZ LIBRARY
HARVARD UNIVERSITY
CAMBRIDGE, MA USA

Digitized by Google

Ueber

die Theorie der zusammengesetzten Farben.

Die Lichtstrahlen verschiedener Wellenlänge und Farbe unterscheiden sich in ihrer physiologischen Wirkung dadurch wesentlich von den Tönen verschiedener Schwingungsdauer und musikalischer Höhe, dass je zwei der ersteren, gleichzeitig auf dieselben Nervenfasern einwirkend, eine einfache Empfindung hervorbringen, aus welcher auch das geübteste Sinnesorgan nicht mehr die einzelnen zusammensetzenden Elemente erkennen kann, während zwei Töne durch ihr Zusammenwirken zwar die eigenthümlichen Empfindungen der Harmonie und Disharmonie erzeugen, aber dabei doch stets vom Ohre einzeln empfunden und erkannt werden. Diese Vereinigung der Eindrücke zweier verschiedener Farben zu einem einzigen neuen Farbeneindruck ist offenbar ein rein physiologisches Phänomen und hängt nur von der eigenthümlichen Reactionsweise des Sehnerven ab. Objectiv im rein-physikalischen Gebiete findet eine solche Vereinigung niemals statt, die Strahlen verschiedener Farben gehen vielmehr stets ohne allen gegenseitigen Einfluss nebeneinander her, und wo sie dem Auge auch vereinigt erscheinen sollten, sind sie durch physikalische Mittel doch stets von einander zu scheiden.

Die Untersuchung des Zusammenwirkens der Farben hat auf die Lehre von den Grundfarben geführt, aus denen alle andere combinirt wären, oder wenigstens combinirt werden

*

Digitized by Google

könnten. Man hat diese Lehre aber von Anfang an nur auf eine einzige Art von Erfahrungen gegründet, nämlich auf diejenigen, welche durch die Mischung der Farbstoffe gewonnen waren und von denen man stets annahm, dass sie dieselben Resultate geben müssten, wie die Zusammensetzung des gefärbten Lichtes selbst, eine Annahme, deren Unrichtigkeit ich im Folgenden nachzuweisen beabsichtige.

Schon Plinius spricht davon, dass die ältesten griechischen Maler mit vier Farbstoffen alles darzustellen gewusst hätten, während man in seiner Zeit deren vielmehr besässe und damit doch nicht so viel, wie Jene, leistete. Leonardo da Vinci, ebenso berühmt als wissenschaftlicher Bearbeiter der Malerei, wie als Künstler, kennt noch nicht die Lehre von den drei sogenannten Grundfarben, er nennt ausser Schwarz und Weiss, welche jedoch nicht im eigentlichen Sinne Farben wären, vier, nämlich Gelb, Grün, Blau und Roth. Die nachher allgemein angenommenen drei Grundfarben, Roth, Gelb und Blau, finden sich, und zwar, wie es scheint, als eine damals allgemein anerkannte wissenschaftliche Thatsache, einem Versuch zur Classification der Farben und Farbstoffe von Waller zu Grunde gelegt in den Philosophical Transactions des Jahres 1686, also noch vor Newtons Untersuchungen über die Zerlegung des weissen Lichts durch das Prisma, zu einer Zeit, wo man eben noch keine andere Methode, Farben zusammenzusetzen, kannte, als die Mischung der Farbstoffe. Auch in den späteren Versuchen, die natürlichen Farben nach ihrer Zusammensetzung aus den genannten drei Grundfarben zu classificiren, von Castell, dem Astronomen Mayer, Lambert, Hay, Forbes*) wird überall die Mischung der Farbstoffe zu Grunde gelegt. Als Repräsentanten der Grund-

*) P. Castell Farbenclavier.
Mayer in Göttinger gel. Anzeigen. 1758. St. 147.
J. H. Lambert Beschreibung einer Farbenpyramide. Berlin, 1772 (darin ist auch die ältere Literatur zusammengestellt).
D. R. Hay Nomenclature of Colours.
J. D. Forbes in Philosophical Magazine vol. XXXIV. p. 161.

Digitized by Google

farben, und zur Darstellung der zusammengesetzten Mischfarben gebraucht Mayer Zinnober, Königsgelb, Bergblau, Lambert Carmin, Gummi Gutti und Berliner Blau, welche schon reinere Mischungen geben, und Hay, dessen Geschicklichkeit in der Wahl und dem Gebrauche der Farben für diesen Zweck Forbes besonders rühmt, Carmin, Chromgelb und französisches Ultramarin.

Einige Physiker versuchten es auch, den drei Grundfarben eine objective Existenz anzuweisen. Es war zuerst Mayer, der die Ansicht aufstellte, den drei Grundfarben könnten wohl dreierlei verschiedene Arten Licht, ein rothes, ein gelbes und ein blaues entsprechen, deren jedes Strahlen von allen Abstufungen der Brechbarkeit lieferte. Es wäre demnach an jeder Stelle des Spectrums rothes, gelbes und blaues Licht gemischt, die sich aber nicht durch ihre Brechbarkeit unterschieden und sich deshalb durch das Prisma nicht trennen liessen.

Am rothen Ende des Spectrums sollte das rothe Licht überwiegen, am blauen das blaue, in der Mitte das gelbe. Dieselbe Ansicht wurde später von D. Brewster aufgestellt, und dieser berühmte Physiker glaubte durch Absorption in gefärbten durchsichtigen Mitteln die Trennung der verschiedenen Arten des Lichts in allen Theilen des Spectrums wirklich bewerkstelligen zu können.

Newton hatte nach seiner Entdeckung der Zusammensetzung des weissen Lichtes aus farbigem, sieben Hauptfarben im Spectrum angenommen: Roth, Orange, Gelb, Grün, Blau, Indigo, Violett. Er wählte diese Zahl wahrscheinlich wegen der Analogie, die er zwischen den Farben und den musikalischen Intervallen der Durtonleiter suchte, und die er auch der bekannten Eintheilung seiner siebenfarbigen Scheibe zu Grunde legte. Wohl nur deshalb hat er Blau und Indigoblau unterschieden. Dass er diese Unterscheidung gerade in den blauen Farbentönen vornahm, liegt wohl daran, dass die meisten Prismen die blaue Hälfte des Spectrums unverhältnissmässig ausdehnen, und Newton die Breite der Farbenstreifen unmittelbar mit den musikalischen Intervallen vergleichen wollte. Uebrigens musste er sich mit sehr unvollkommenen Apparaten

Digitized by Google

behelfen, und konnte deshalb auch nur wenige Beobachtungen über die Resultate künstlicher Vereinigung von zwei oder mehreren prismatischen Farben anstellen, welche im Ganzen mit den aus der Mischung von Farbstoffen entnommenen übereinzustimmen schienen. Auch er benutzt daneben die Resultate der Vermischung farbiger Pulver.

Newton hat seine Spectra stets mit Sonnenlicht dargestellt und nicht die Methoden angewendet, welche nöthig sind, um ganz vollständige Trennung der verschiedenfarbigen Strahlen zu erhalten, deshalb auch nicht die Fraunhofer'schen Linien im Sonnenlichte gesehen. Wollaston *) stellte zuerst ein so reines Spectrum dar, dass einige dieser Linien darin gesehen werden konnten. Er blickte nach einer feinen Spalte, welche Tageslicht einfallen liess, durch ein sehr gutes Flintglasprisma mit unbewaffnetem Auge hin, und sah, wie es unter diesen Umständen in der That der Fall ist, vier gut abgegrenzte Farbenstreifen im Spectrum: Roth, Gelbgrün, Blau und Violett. Es ist nämlich der Uebergang von röthlichem Orange durch Orange und Gelb in Gelbgrün, der von Grün in Blau, und von Blau in Violett im Flintglasspectrum so schnell, dass er ohne Anwendung eines vergrössernden Fernrohres dem Auge fast verschwindet. Dabei begrenzen die Fraunhofer'schen Linien *G* und *H* das Violett auf beiden Seiten sehr scharf, der Uebergang von Grün in Blau wird durch die Linien *b* und *F* markirt, und der an sich schon sehr schmale Streifen des reinen Gelb ist im reflectirten Himmelslichte verhältnissmässig lichtschwach, so dass es gegen das stärkere Roth und Grün zurücktritt, und diese beiden Farben unmittelbar aneinander zu grenzen scheinen. Wollaston nimmt deshalb vier Grundfarben an: Roth, Grün, Blau, Violett.

Thomas Young tritt Wollaston's Beschreibung des Spectrums bei und verändert darnach seine Theorie des Farbensehens, welche er zuerst auf die gewöhnlich angenommenen drei Grundfarben: Roth, Gelb und Blau gegründet hatte, indem er dafür jetzt Roth, Grün und Violett setzt, wobei man

*) Philos. Transact. 1802. P. II. p. 378.

Digitized by Google

voraussetzen muss, dass er gewusst habe, aus prismatischem Roth und Grün lasse sich Gelb, aus prismatischem Grün und Violett Blau mischen. Die erwähnte Theorie von Young ist wichtig, weil darin den drei Grundfarben eine bestimmte physiologische Bedeutung untergelegt wird. Er nimmt an, dass die an der Oberfläche der Retina gelegenen Theilchen eigenthümlicher Schwingungen fähig wären, und dass an jeder Stelle Theilchen von dreierlei verschiedener Schwingungsdauer sich nebeneinander vorfänden, entsprechend den Oscillationsgeschwindigkeiten der drei Grundfarben, Violett, Grün und Roth, welche in Verhältniss wie 7, 6 und 5 ständen. Wäre die Schwingungszahl eines Lichtstrahls 5, so würde er blos auf die rothempfindenden Nervenenden wirken, wäre sie $5^1/_2$, so würde er gleichzeitig die roth- und die grünempfindenden anregen, und dadurch die gemischte Empfindung des Gelb hervorbringen u. s. w.

Uebrigens habe ich ebensowenig wie Forbes, bei Newton's Nachfolgern bis in die neueste Zeit Versuche über die Mischung einzelner prismatischer Farben gefunden. Es scheint, dass man die Sache stets durch die Mischversuche mit farbigen Pulvern als vollständig erledigt angesehen hat. Ja, man hat sich sogar durch abweichende Resultate, welche der Farbenkreisel gab, nicht darauf aufmerksam machen lassen, dass hier Schwierigkeiten verborgen liegen.

Die Zurückführung der Farben auf drei Grundfarben hat bei den verschiedenen Beobachtern dreierlei verschiedenen Sinn:

1. entweder, dass die Grundfarben solche seien, aus denen alle möglichen anderen zusammengesetzt seien, oder sich mindestens zusammensetzen liessen;

2. oder, wie bei Mayer und Brewster, dass die Grundfarben dreierlei objectiven Arten des Lichtes entsprächen;

3. oder, dass sie, wie bei Thomas Young, dreierlei verschiedenen Grundempfindungsarten der Sehnervenfasern entsprächen, aus denen die übrigen Farbenempfindungen sich zusammensetzten.

Auf die zweite Ansicht und die Gründe, wodurch Brewster

Digitized by Google

sie zu stützen versucht hat, werde ich an einem anderen Orte zurückkommen, und glaube, im Stande zu sein, diese Gründe zu widerlegen. Die beiden anderen Ansichten müssen aber jedenfalls an den prismatischen Farben, als den reinsten und gesättigsten, welche wir kennen, geprüft werden. Das soll die Aufgabe vorliegenden Aufsatzes sein.

Das Mittel, dessen ich mich bedient habe, um sämmtliche Combinationen aus je zwei einfachen Spectralfarben herzustellen, ist folgendes: Ich schneide in einen schwarzen Schirm zwei hinreichend schmale ($^1/_4$ Linie breite) Spalte ein, welche zusammen ein V bilden. Beide sind unten 45° gegen den Horizont geneigt, stossen mit ihren unteren Enden zusammen und schliessen somit einen rechten Winkel zwischen sich ein. Nach diesen Spalten sieht man aus genügender Entfernung (12 Fuss) durch ein Fernrohr und Prisma hin. Das Prisma ist dicht vor dem Objectivglase des Fernrohrs in der Stellung der kleinsten Ablenkung befestigt, und die Kante seines brechenden Winkels steht vertical. Es ist bekannt, dass man durch ein verticales Prisma, nach einem verticalen Spalte blickend, ein rechteckiges Spectrum sieht, in welchem die Farbenstreifen und die Frauenhofer'schen Linien vertical verlaufen. Sieht man durch ein verticales Prisma nach einem schiefen Spalte, so bekommt das Spectrum die Form eines schiefwinkeligen Parallelogramms, mit zwei horizontalen und zwei dem schiefen Spalte parallelen Seiten. Die Farbenstreifen und Fraunhoferschen Linien laufen natürlich hier auch dem Spalte parallel. Sehen wir nach unserem zusammengesetzten Winkelspalte, so decken sich die Spectra seiner beiden Schenkel theilweise, und da in dem einen die Farbenstreifen von oben links nach unten rechts, im andern von oben rechts nach unten links verlaufen, so durchschneiden sie sich gegenseitig unter rechten Winkeln. Jeder Farbenstreifen des einen schneidet in dem beiden Spectren gemeinsamen Felde jeden des andern, und wir bekommen somit gleichzeitig sämmtliche Combinationen, welche aus je zwei einfachen Farben gebildet werden können.

Da es darauf ankommt, die Spalte in ihrer ganzen Ausdehnung gleichmässig zu erleuchten, kann man directes Son-

Digitized by Google

nenlicht nicht wohl anwenden, und muss sich mit reflectirtem Lichte des Himmels, oder mit dem einer gleichmässig von der Sonne beschienenen weissen Fläche begnügen. Diese Erleuchtungen reichen aber in der Regel auch vollkommen aus.

Das von mir angewendete Flintglasprisma, dem Hrn. Professor Neumann zugehörig, liess bei Anwendung von Sonnenlicht und einem feinen Spalte eine sehr grosse Zahl der feineren Fraunhofer'schen Linien sehen. In dem Spectrum des eben beschriebenen, etwas breiteren Winkelspaltes waren wenigstens die stärkeren noch deutlich sichtbar, namentlich die von Fraunhofer durch die Buchstaben *A*, *B*, *D*, *E*, *b*, *F*, *G* und H bezeichneten. Die Anwesenheit dieser Linien giebt zunächst die Bürgschaft dafür, dass in dem Spectrum jedes einzelnen Schenkels die verschiedenfarbigen Strahlen nicht über einander greifen konnten, dass ich es also mit wirklich reinen Farbenstrahlen zu thun hatte, und zweitens erleichtern sie sehr die Orientirung in dem gemischten Felde, durch welches man sie deutlich verlaufen sehen kann. Mein Fernrohr hat ein Fadenkreuz aus zwei sich rechtwinkelig kreuzenden Fäden, diese stellte ich den dunkelen Linien der beiden sich deckenden Spectra parallel. Die Fäden bezeichnen dann nach dem oberen und unteren Rande des lichten Feldes zu, wo ungemischte Farben liegen, unmittelbar die beiden reinen Farben, welche an ihrem Kreuzungspuncte gemischt sind.

Es ist nöthig, die relative Intensität der gemischten Farben ändern zu können. Das bewirkte ich, indem ich das Prisma aus seiner verticalen Stellung in eine mehr oder weniger schiefe brachte. Seine Fassung, mit der es an das vordere cylindrische Ende des Fernrohrs befestigt war, liess sich um dieses als Axe drehen, und es konnte so in jede beliebige Stellung gegen den Horizont gebracht werden. Um zu erläutern, wie dadurch die Lichtintensität des Spectrums geändert werde, beschränken wir unsere Betrachtung zunächst auf einen einzigen Spalt. Die Lichtintensität des Spectrums hängt von der Menge Licht ab, die durch den Spalt auf das Prisma und Fernrohr fällt, und von dem scheinbaren Flächenraum des Spectrums, zu dessen Beleuchtung diese Lichtmenge verwendet

Digitized by Google

wird. Die Lichtmenge, welche überhaupt einfällt, ändert sich nicht, wenn wir das Prisma um die Axe des Fernrohrs drehen, wohl aber der erleuchtete Flächenraum des Spectralbildes. Letzterer hat, wie schon oben bemerkt ist, die Gestalt eines Parallelogramms. Zwei seiner Seiten sind der Spalte parallel und stets eben so lang, wie die Spalte selbst im Fernrohr erscheint. Die beiden anderen Seiten stehen senkrecht auf der Kante des brechenden Winkels, und ihre Länge hängt nur von der zerstreuenden Kraft des Prisma ab. Das Spectrum bildet also ein Parallelogramm, dessen Seiten constant sind, dessen Winkel aber durch Drehung des Prisma um die Axe des Fernrohrs geändert werden können. Bekannte Sätze der elementaren Geometrie lehren, dass der Flächeninhalt eines solchen Parallelogramms am grössten ist, wenn es rechte Winkel hat, und desto kleiner wird, je schiefer die Winkel werden. Da nun eine gleiche Menge Licht eine kleinere Fläche heller erleuchtet, als eine grössere, so muss die scheinbare Helligkeit des Spectralbildes am kleinsten sein, wenn es ein Rechteck ist, d. h. wenn die brechende Kante der Spalte parallel ist, und desto heller werden, je grösser der Winkel zwischen beiden wird.

Die beiden Schenkel unsers Winkelspaltes geben, durch ein verticales Prisma gesehen, zwei gleich helle Spectren, weil die Richtung der brechenden Kante mit beiden den gleichen Winkel von 45° macht, drehen wir aber das Prisma um die Axe des Fernrohrs, so wird der eine Winkel grösser, der andere kleiner, und es variiren dabei die beiden Spectren in jedem beliebigen relativen Verhältniss ihrer Helligkeit.

Je heller man auf diese Weise ein Spectrum macht, desto näher rücken seine Farbenstreifen zusammen, um daher die Reinheit der Farben nicht zu sehr zu beeinträchtigen, ist es rathsam, stärkere Unterschiede der Helligkeit nicht auf die bisher beschriebene Weise hervorzubringen, sondern durch andere Mittel. Sehr leicht geschieht dies, indem man dünnere oder dickere, geölte oder nicht geölte Papierblättchen hinter die eine Spalte setzt. Diese lassen nur einen kleinen Theil

Digitized by Google

des auffallenden Lichtes durchscheinen, während durch die andere Spalte das ungeschwächte Himmelslicht einfällt.

Hat man sich in der beschriebenen Weise ein Feld hergestellt, welches mit den Mischfarben je zweier reiner Spectralfarben bedeckt ist, so wird man sich bald überzeugen, dass man die Färbung namentlich der weisslicheren Stellen dieses Feldes zu beurtheilen unfähig ist, so lange man gleichzeitig gesättigte Farben daneben hat.

Es ist also durchaus nöthig, die Stellen, über deren Farbe man urtheilen will, getrennt von den übrigen zu betrachten. Wenn man mit dem Fernrohr beobachtet, ist das Mittel dazu sehr einfach. Man stelle das Fadenkreuz auf die fragliche Stelle ein und entferne sich mit dem Auge ein bis zwei Fuss vom Oculare. Aus dieser Entfernung sieht man nur eine sehr kleine Stelle des farbigen Bildes durch das Ocular hindurch, deren Farbe man unbehindert durch die Gegensätze blendenderer Farben beurtheilen kann. Die Fäden des Fadenkreuzes und ihre Kreuzungsstelle findet man, wenn man fernsichtig genug ist, auch bei dieser Entfernung des Auges leicht wieder, wenn nicht, doch mit Hülfe eines schwachen Concavglases, welches der Accommodation des Auges passend nachhilft. Um die beobachtete Farbencombination schnell wiederfinden und einem Anderen zeigen zu können, bringe ich in dieser Entfernung vom Oculare des Fernrohrs einen verstellbaren dunkelen Schirm mit einer kleinen runden Oeffnung an, durch welches das Auge nach dem Oculare des Fernrohrs hinzusehen hat. Will man statt der zusammengesetzten Farbe wieder die beiden constituirenden einfachen sehen, so lässt man von einem Anderen erst die eine, dann die andere Spalte bedecken, so dass immer nur eine der beiden gemischten Farben stehen bleibt, oder man schaltet zwischen das Auge und die Oeffnung im Schirm, wodurch es nach dem Oculare hinsieht, ein zweites kleines Prisma ein, welches statt des einen hellen Fleckes im Oculare zwei mit getrennten Farben erscheinen lässt. Zur sicheren Bestimmung sehr weisslicher Mischfarben ist es vortheilhaft, ein weisses, weiss erleuchtetes Papierblatt rings um die Oeffnung des Oculars anzubringen, und mit

Digitized by Google

dessen Farbe die beobachtete Farbe zu vergleichen. Auch habe ich bemerkt, dass dass Auge bei längerer Betrachtung sehr weisslicher Mischfarben für feine Farbenunterschiede unempfindlich wird, und es rathsam ist, es zuweilen eine Zeit lang ausruhen, oder auf den Gegenständen der Umgebung herumschweifen zu lassen. Bei erneuerter Beobachtung der Mischfarbe sieht man dann oft eine farbige Beimischung des scheinbaren Weiss deutlich, die man vorher nicht mehr erkennen konnte, und die bei längerer Betrachtung auch wieder verschwindet.

Auf diese Weise ist es möglich, sämmtliche Combinationen zweier prismatischen einfachen Strahlen in allen Abstufungen ihrer relativen Stärke herzustellen und ungestört von andern Farbeneindrücken zu betrachten. Meine Beobachtungen, deren Hauptpuncte ich mir von mehreren anderen, in Beurtheilung der Farben geübten Personen bestätigen liess, um nicht durch etwa vorhandene subjective Fehler meiner Augen getäuscht zu werden, haben folgende von den bisherigen Ansichten zum Theil auffallend abweichende Resultate gegeben.

1. Roth giebt mit Orange ein röthlicheres Orange, mit Gelb Orange; die gemischten Farben unterscheiden sich nicht merklich von den Abstufungen des Orange, die in dem einfachen Spectrum vorkommen. Mit Grün giebt es ein Gelb, welches, weniger gesättigt, fahler ist, als das einfache Gelb, und bei vorwaltendem Roth durch Orange in Roth, bei vorwaltendem Grün durch Gelbgrün in Grün übergeht. Mit den grünblauen Tönen des Spectrums entsteht eine fleischfarbene, mit den himmelblauen eine rosarothe Farbe, welche bei überwiegendem Blau in weissliches Violett, mit überwiegendem Roth in Carminroth übergeht. Vereinigt man endlich das Roth mit weiter nach dem Ende des Spectrums hin gelegenen indigoblauen oder violetten Strahlen, so bekommt man ein immer dunkleres und gesättigteres Purpurroth.

2. Orange mit Gelb giebt ein gelblicheres Orange, mit Grün ein fahles Gelb, mit Blau fleischfarbene Töne, die bei Indigo und Violett in Carminroth übergehen.

3. Gelb mit Grün giebt ein grünliches Gelb, ähnlich den

Digitized by Google

dazwischen gelegenen Farbentönen des Spectrums. Mit Himmelblau giebt es ein schwach grünliches Weiss, mit Indigoblau reines Weiss, mit Violett ein schwach fleischfarbenes Weiss, was bei überwiegenderem Violett in weissliches Violett, bei überwiegenderem Gelb in weissliches Gelb übergeht.

4. Grün giebt mit Blau Grünblau, mit Indigo ein Hellblau, welches aber viel matter und weisslicher ist, als das des Spectrums, ebenso mit Violett Hellblau.

5. Blau mit Indigo giebt die zwischenliegenden Töne, mit Violett ein Dunkelblau, was aber weniger gesättigt ist, als das Indigo des Spectrums.

6. Indigo mit Violett die zwischenliegenden Töne.

Die auffallendste und von den bisherigen Ansichten abweichendste Thatsache ist die, dass unter den Farben des Spectrums nur zwei vorkommen, welche zusammen reines Weiss geben, also Complementärfarben sind, und dass dies Gelb und Indigoblau sind, zwei Farben, aus deren Verbindung man bisher fast immer Grün entspringen liess. Das Gelb, was man zu dieser Mischung gebraucht, ist ein sehr schmaler Strich im Spectrum, zwischen den Linien *D* und *E* gelegen, und etwa dreimal so weit von *E*, als von *D* entfernt, ein Gelb, welches weder in das Orange, noch in das Grünliche zieht und unter den Pigmenten am besten durch das chromsaure Bleioxyd (Chromgelb) wiedergegeben wird. Das dazu gehörige Blau hat eine grössere Breite und umfasst die Abstufungen dieser Farbe, welche Newton und Fraunhofer als Indigo bezeichnen, etwa von der Mitte zwischen den Linien *F* und *G* bis gegen *G* hin. Unter den Farbstoffen giebt dunkles Ultramarin diese Farbe aber besser wieder, als das mehr violette Indigo. Hat man die Mischungsfarben durch zwei gleich helle Spectra eines Flintglasprisma hervorgebracht und zur Erleuchtung das Licht der Wolken gebraucht, so ist es gerade die Mitte zwischen den Linien *F* und *G*, welche für das Weiss die richtige Lichtintensität hat. Nach dem Violett und der Linie *G* zu wird das Blau immer lichtschwächer, und hier muss es daher relativ zum Gelb verstärkt werden, um Weiss zu geben. Aus

Digitized by Google

diesem Grunde fällt z. B. im Spectrum eines weisslich blauen Himmels das Weiss nahe der Linie *G*. Auch das hellere Blau des Spectrums mehr nach der Linie *F* hin giebt mit reinem Gelb, und das Violett mit einem etwas in das Grünliche ziehenden Gelb bei passender Abgleichung ihrer relativen Intensitäten Farbentöne, welche dem Weiss sehr ähnlich werden, aber doch immer einen Anflug von Färbung behalten. Sie ziehen meist in das Fleischfarbene, Bläuliche und Grünliche hinüber, zuweilen ist es auch schwer, der Färbung einen bestimmten Namen zu geben, aber niemals ist es mir gelungen, aus diesen Farben ein klares, reines Weiss zu erhalten. Wenn die Untersuchung mit vollkommeneren Instrumenten ausgeführt würde, als es die meinigen waren, welche dem Felde der zusammengesetzten Farben eine grössere Flächenausdehnung zu geben erlaubten, würden sich die Grenzen der weissgebenden Strahlen wahrscheinlich genauer angeben lassen, weil die Vergleichung der Farbentöne grösserer Flächen viel leichter und schärfer auszuführen ist.

Durch die weissgebenden Strahlen wird die ganze Breite des Spectrum in drei Abtheilungen getheilt. Deren erste, die rothe, entspricht, wenn man die Verhältnisse der Lichtschwingungen mit denen der Schallwellen vergleicht, etwa dem Intervalle einer kleinen Terz, die mittlere grüne einer grossen Terz, und die dritte violette ist etwas kleiner als eine kleine Terz. Farben der ersten und zweiten verbinden sich zu gelben Tönen mit Uebergängen in Roth, Fleischfarben, Weiss und Grün, solche der zweiten und dritten zu blauen mit Uebergängen in Grün, Weiss und Violett, solche der ersten und dritten zu purpurrothen mit Uebergängen in Fleischfarben, Rosa und Violett.

Was die Zusammensetzungen von drei einfachen Farben betrifft, so dürfen wir wohl voraussetzen, dass Weiss nur dann entstehen kann, wenn Strahlen aus den drei verschiedenen Abtheilungen des Spectrum passend vereinigt werden. Es lässt sich wenigstens nicht annehmen, obgleich man natürlich durch das Experiment nicht alle möglichen Combinationen erschöpfen kann, dass z. B. die gelben oder gelblichen Far-

Digitized by Google

ben, welche aus solchen der rothen und grünen Abtheilung entstehen, durch weiteren Zusatz von einer oder mehreren Farben, welche diese Abtheilungen enthalten, Roth, Gelb oder Grün, in Weiss übergehen sollten. Eben so ist es mit den Mischungen der grünen und violetten, so wie mit denen der rothen und violetten Abtheilung. Dagegen gelingt es, Weiss aus ziemlich mannigfaltigen Combinationen solcher drei Farben zu bilden, welche aus allen drei Abtheilungen gleichzeitig entnommen sind. Ich habe dazu einen schwarzen Schirm mit drei Spalten gebraucht. Zwei waren parallel unter 45° gegen den Horizont geneigt, und standen in solcher Entfernung von einander, dass durch das Prisma aus der gewöhnlichen Entfernung gesehen, das Violett des einen auf das Roth des andern fiel. Den Spalt, welcher das Violett giebt, muss man etwa doppelt so breit machen, als den andern, weil sonst das Violett zu lichtschwach gegen das Roth wird. Ein dritter Spalt, der das Grün zur Mischung geben sollte, wurde rechtwinkelig gegen die beiden ersteren zwischen ihnen eingeschnitten, so dass die drei Spalten zusammen einem liegenden *Z* ähnlich wurden. Das Spectrum des dritten schneidet rechtwinkelig durch den Purpurstreif, den die beiden andern geben, und erzeugt eine Reihe von Mischfarben, aus denen man leicht die weisseste Stelle aussuchen kann. Durch Drehung des Prisma um die Axe des Fernrohrs lässt sich das Verhältnisss der gemischten Farben dann so abgleichen, dass man reines Weiss bekommt. So erhält man Weiss aus Roth, Grün und Violett, welche man zu drei Paaren von Complementärfarben verbinden kann, nämlich

einfaches Roth und zusammengesetztes mattes Blaugrün,
„ Grün „ „ Purpurroth,
„ Violett „ mattes Gelb.

Auffallend ist hierbei, dass die Complementärfarben des einfachen Roth und Violett sich von gewissen Farbentönen des Spectrum nur durch ihr minder gesättigtes Aussehn unterscheiden, und dennoch die ersteren mit einfachem Roth und Violett Weiss geben, letztere nicht.

Newton's wenige Beobachtungen über die Zusammen-

Digitized by Google

setzung je zweier prismatischer Farben stimmen mit meinen Angaben überein. Er giebt an, die primitiven Farben könnten durch Vereinigung der beiderseitigen Nachbarfarben wiedergegeben werden*), so z. B. Orange durch Roth und Gelb, Gelb durch Orange und Grüngelb, Grün durch Grüngelb und Meergrün, oder auch, aber weniger gut, durch Gelb und Blau *(cyaneum)*, Blau durch Meergrün und Indigoblau. Ausserdem hat er Purpurroth aus Roth und Violett dargestellt. Weiss hat er nur durch je drei Farben, Roth, Violett und Grün erhalten, und damit es gut gelinge räth er sogar, Spectra mit unvollkommen getrennten Farben anzuwenden. Dabei mischen sich dann noch mehr als drei Einzelfarben.

Dagegen wird man bemerkt haben, dass meine Angaben über das Zusammenwirken der prismatischen Farben erheblich von denen abweichen, welche man aus der Mischung von Farbstoffen gewonnen hatte. Namentlich, dass Gelb und Blau nicht Grün, sondern höchstens ein schwach grünliches Weiss geben sollten, widerspricht der tausendjährigen Erfahrung aller Maler auf das entschiedenste. Der Grund des Widerspruchs wird aber durch eine kurze Ueberlegung, wie Farbstoffe auf das Licht wirken, klar werden. Farbstoffe, wie alle gefärbte Körper, welche wir in grösseren Stücken von regelmässigem Gefüge besitzen, z. B. der krystallinische Zinnober, das krystallisirte chromsaure Bleioxyd, das Kobaltglas, aus welchem die Smaltefarben gemacht werden, sind durchsichtig oder wenigstens durchscheinend. Fällt Licht auf sie, so wird von ihrer äusseren Oberfläche zunächst ein Theil desselben als weisses Licht reflectirt, ein anderer geht in das Innere, wird hier durch ungleichmässige Absorption der ihn zusammensetzenden einfachen Strahlen farbig, wird an der hinteren Begrenzungsfläche des Körpers reflectirt, und kehrt nach vorn zum Auge des Beobachters zurück, der eben wegen der Farbe dieses vorgedrungenen und im Körper selbst reflectirten Lichts diesen gefärbt sieht. Zerpulvern wir dagegen einen Farbstoff, so sieht der

*) Lectiones opticae. P. II. S. I. Prop. IV. und Optice Lib. I. P. II. Prop. IV.

Digitized by Google

Beobachter von dem auffallenden Lichte nicht blos das in sein Auge zurückkehren, was an der vorderen und hinteren Oberfläche der obersten Lage von Pulvertheilchen, sondern auch, was von der zweiten, dritten u. s. w. reflectirt ist. Eine einzelne ebene Glastafel reflectirt von senkrecht einfallendem Licht nur $^1/_{25}$, zwei solche $^1/_{13}$, sehr viele fast alles. Wir können daraus schliessen, dass von dem Licht, welches auf feines weisses Glaspulver fällt, nur der kleinste Theil von den zu oberst liegenden Theilchen, ein bei weitem grösserer, von den tieferen reflectirt wird. Ebenso wird es sich bei gefärbten Pulvern verhalten müssen, wenigstens mit denjenigen Arten der einfachen Strahlen, deren Farbe sie tragen, und welche sie ohne Absorption hindurchzulassen pflegen; das meiste Licht dieser Art wird aus den tieferen Schichten kommen und durch eine grössere Anzahl von Pulvertheilchen hindurchgegangen sein.

Wie wird es sich nun verhalten, wenn wir Pulver von verschiedener Farbe mischen, z. B. gelbes und blaues? Die oberflächlich gelegenen blauen Theilchen werden blaues, die oberflächlichen gelben gelbes Licht geben, beides zusammen wird sich zu Weiss oder grünlichem Weiss vereinigen. Ganz anders ist es aber mit dem Lichte, welches aus der Tiefe zurückkehrt. Dies muss abwechselnd durch gelbe und durch blaue Theilchen hindurchdringen, es wird also aus der Tiefe nur solches Licht zurückkehren, welches sowohl von den blauen als auch von den gelben durchgelassen wird. Blaue Körper pflegen grünes, blaues und violettes Licht in merklicher Menge durchzulassen, gelbe dagegen rothes, gelbes und grünes. Durch beide zugleich geht also nur grünes, und es kann aus der Tiefe des gemischten Pulvers nur grünes Licht zurückkehren. Da nun die von den oberflächlichen Theilen des Pulvers reflectirte Lichtmenge nach dem vorher Gesagten viel kleiner zu sein pflegt, als die aus der Tiefe zurückkehrende, so wird das Grün der letzteren bei weitem überwiegen und die Farbe der Mischung bestimmen.

Wenn wir also zu einem blauen Pulver gelbes hinzumischen, wird die Farbe der Mischung weniger dadurch verändert, dass zu den Farbestrahlen des blauen Pulvers sich noch solche des

Digitized by Google

gelben hinzu addiren, als vielmehr dadurch, dass von jenen Farbestrahlen noch der violette und blaue Theil verloren geht, und nur das Grüne übrig bleibt. Daher pflegen Mischungen zweier Farbestoffe von etwa gleicher Helligkeit auch dunkler zu sein, als ihre Constituenten, namentlich dann, wenn letztere solche Farben darbieten, welche in der prismatischen Reihe weit aus einander liegen, und deshalb wenig gemeinsame Farbenstrahlen enthalten. So giebt Zinnober und Ultramarin statt des Rosa, welches der Zusammensetzung ihres Lichts entspricht, ein etwas in das Violette ziehendes Schwarzgrau.

Die vorstehende Theorie der Farben gemischter Farbstoffe ist einfach abgeleitet aus allgemein anerkannten physikalischen Vorstellungen, erklärt die Erscheinungen, so weit ich sehen kann, vollständig und weiset nach, dass Mischung der Farbstoffe und Zusammensetzung der Farben zwei durchaus verschiedene Vorgänge sind, und dass die durch die erstere gewonnenen Erfahrungen durchaus keinen Schluss auf die letztere gestatten. Nur wenn wir es mit zwei im Spectrum wenig von einander abstehenden Farben zu thun haben, giebt die Zusammensetzung des farbigen Lichts fast dieselben Resultate, wie die Mischung der Pigmente, weil dann die zusamengesetzte Farbe den zwischenliegenden Farbentönen des Spectrums ähnlich ist.

Es giebt aber zwei andere Methoden das von Pigmentfarben kommende Licht zusammenzusetzen, bei denen man Resultate erhält, welche ganz den bei der Zusammensetzung ähnlicher prismatischer Farben erhaltenen entsprechen. Die erste dieser Methoden ist die Vereinigung der Farben auf dem Farbenkreisel. Man hat längst bemerkt, dass sie andere Resultate giebt, als die Mischung der Pigmente. Ich wiederholte die Versuche mit Gelb und Blau. Für ersteres wendete ich entweder Gummi Gutti oder Chromgelb an, für letzteres Bergblau oder Ultramarin. Bei schneller Umdrehung erhält man ein reines Grau. Sehr frappant stellt sich der Unterschied beider Methoden heraus, wenn man die Mitte der Scheibe mit der Mischung beider Pigmente anstreicht, am Rande dagegen

Digitized by Google

Sectoren mit den reinen Pigmenten. Dann sieht man beim schnellen Umdrehen der Scheiben in der Mitte Grün, am Rande Grau. Jenes ist viel dunkler als letzteres, wie es nach der oben gegebenen Theorie erwartet werden musste.

Die andere Methode habe ich noch nicht beschrieben gefunden, kann sie aber als sehr bequem empfehlen. Sie ist zugleich von dem Uebelstande frei, dass die Mischfarben das graue Ansehn wie auf den Farbenscheiben bekommen; man kann durch sie vielmehr wirklich Weiss aus complementär gefärbten Pigmenten erzeugen. Man stelle eine Glasplatte mit planen und parallelen Flächen senkrecht auf einer Tischplatte auf, und lege vor ihr eine gefärbte Oblate hin. Diese sieht man in der Glasplatte gespiegelt, und der scheinbare Ort ihres Spiegelbildes ist jenseits der Platte und ebenfalls auf der Oberfläche des Tisches. Man kann nun genau an dieselbe Stelle, wo sich scheinbar die gespiegelte Oblate befindet, eine andere eben so grosse aber anders gefärbte hinlegen, welche der Beobachter durch das spiegelnde Glas hindurch sieht. Sein Auge wird dann von zweierlei Strahlen getroffen, welche beide von ganz demselben Körper auszugehen scheinen, die einen dem durchgegangenen, die anderen dem gespiegelten Lichte angehörig. Es erscheint ihm deshalb eine Oblate, deren Farbe aus denen der beiden wirklich vorhandenen Oblaten zusammengesetzt ist. Um den Versuch bequem anzustellen, braucht man nur ein ganz kleines, möglichst dünnes planparalleles Glasplättchen anzuwenden, welches man etwa in der Entfernung des deutlichen Sehens über der Tischplatte und senkrecht gegen diese befestigt. Man sieht von oben schief durch das Plättchen nach der Tischplatte hin, und legt sich die Oblaten an passende Stellen, um die Vereinigung ihrer Farben hervorzubringen. Je näher man beide der imaginären Durchschnittslinie der Ebene des Tisches und der Glastafel schiebt, desto schiefer fallen die Strahlen auf die Platte, desto weniger gehen durch, desto mehr werden reflectirt, so dass dann die Farbe des reflectirten Lichts die überwiegende wird. Umgekehrt überwiegt die Farbe des durchgehenden Lichts, wenn man die Oblaten von jener Durchschnittslinie entfernt, und man kann

Digitized by Google

auf diese Weise sämmtliche Abstufungen der relativen Stärke in der Zusammensetzung hervorbringen. Man giebt bei diesem Versuche entweder beiden Oblaten einen schwarzen Grund, oder wenn man weissliche Farbenverbindungen hervorbringen und mit reinem Weiss vergleichen will, der einen, am besten der helleren von beiden, einen weissen, der anderen einen schwarzen Grund. Bei der Beobachtung durch das Glasplättchen erscheint dann die Oblate in der zusammengesetzten Farbe auf weissem Grunde. Es versteht sich, dass man so die Farben von allen beliebigen gefärbten Flächen, auch von gefärbten Gläsern zusammensetzen kann.

So zusammengesetzte Farben zeichnen sich durch Helligkeit und Klarheit sehr vor den durch Mischung der Farbstoffe erhaltenen aus, und stimmen auch nicht immer der Art nach mit diesen überein, sondern geben vielmehr dieselben Resultate, welche wir aus der Vereinigung prismatischer Farben gewonnen hatten. Namentlich geben Blau und Gelb nicht Grün, sondern Weiss. Als Repräsentanten des Gelb brauchte ich Papierscheibchen, welche ich mit hellem Chromgelb oder Gummi Gutti getuscht hatte. Unter den blauen Farbstoffen gab, ebenfalls auf solche Scheibchen aufgetragen, ein schön himmelblaues Kobaltblau mit den beiden Arten des Gelb reines Weiss, künstliches Ultramarin röthliches Weiss, und helles Berliner Blau ein schwach grünliches Weiss. Zinnoberroth mit Blau combinirt giebt Rosa, dasselbe Roth mit Grün giebt Gelb u. s. w. Kurz es weisen diese Versuche nach, dass nicht blos die einfachen Farbenstrahlen des Spectrums andere Gesetze des Zusammenwirkens haben, als man bisher allgemein angenommen hatte, sondern dass ganz ähnliche Gesetze auch für die zusammengesetzten Farben der Pigmente gelten, und es scheint mir nicht zweifelhaft zu sein, dass diese neuen Gesetze an die Stelle der älteren, auf die Mischung der Farbstoffe gegründeten zu setzen seien.

Man wird dabei am besten von der Vereinigung einfacher Farben des Sonnenspectrums ausgehen, weil diese den reinsten und vollkommensten, schon bei geringer Lichtintensität fast blendenden Eindruck von Farbe machen, gegen den alle Pig-

Digitized by Google

mentfarben matt und grau aussehen. Schon Newton hat als Regel aufgestellt, dass eine jede einfache Farbe durch eine Vereinigung ihrer beiden nächsten Nachbarfarben wiedergegeben werden könne. Meine eigenen Untersuchungen bestätigen dies, ich muss aber zugleich hinzufügen, dass der Abstand der combinirten Farben nicht sehr gross sein darf, wenn die zusammengesetzte den zwischenliegenden Abstufungen des Spectrums ähnlich sehen soll. Namentlich ist dies im mittleren Theile des Spectrums der Fall. Roth und Gelb giebt ein Orange, dessen Ansehen dem des einfachen Orange vollständig gleich erscheint, und ebenso können die aus Blau und Violett zusammengesetzten Arten des Indigoblau wohl kaum vom einfachen Indigoblau unterschieden werden. Dagegen giebt schon Gelbgrün und Blaugrün ein Grün, dessen Farbenton dem des prismatischen mittleren Grün zwar entspricht, welches aber entschieden weisslicher und matter ist, so dass das einfache Grün nur aus solchen Farben gemischt werden kann, die sich fast gar nicht im Ansehn von ihm unterscheiden. Gelb und Blau erscheinen in dieser Beziehung weniger empfindlich, als Grün. Ersteres setzt sich noch ziemlich gut aus Orange und Gelbgrün zusammen, wird aber sehr fahl aus Roth und Grün, letzteres wiederum lässt sich gut aus Blaugrün und Indigo zusammensetzen, wird aber sehr matt aus Grün und Violett. Was die Endfarben des Spectrums, Roth und Violett, betrifft, so lässt sie Newton in seinem Farbenkreise sich aneinanderschliessen, und unterwirft sie dann auch der besprochenen Regel der Vereinigung von benachbarten Farben. In der That kann man aus Indigoblau und sehr wenig Roth eine Art Violett erzeugen, welches aber immer mehr in Weiss oder Rosa zieht, als das einfache Violett. Viel unvollkommener noch erscheint meinem Auge die Nachahmung des Roth durch Orange und Violett; ihre Combination geht immer in die carminrothen Töne oder in Weiss hinüber, und es ist mir nicht gelungen, eine erträgliche Nachahmung des reinen Roth zu erhalten.

Stellten wir uns also die Aufgabe, sämmtliche Farbentöne des Spectrums durch Zusammensetzung möglichst weniger ein-

Digitized by Google

facher Farben nachzuahmen, so brauchen wir dazu mindestens fünf der letzteren, nämlich: Roth, Gelb, Grün, Blau, Violett. Indessen muss ich es noch dahingestellt sein lassen, ob diese ganz vollständig genügen und ob nicht bei vortheilhafteren Apparaten, wo es möglich wäre, grössere Felder nebeneinander mit den entsprechenden zusammengesetzten und einfachen Farben zu erleuchten, ein geübtes Auge Unterschiede erkennen würde, welche in meinem Apparate nicht mehr erkennbar waren. Wollte man sich aber auf drei Farben beschränken, so würde man dazu am besten die drei einfachen Farben wählen, welche sich am wenigsten gut nachahmen lassen, nämlich Roth, Grün und Violett, dann aber ein Gelb und Blau erhalten, welches den Farben unserer Pigmente gegenüber allerdings noch gesättigt erschiene, mit dem Gelb und Blau des Spectrums aber nicht verglichen werden könnte. Es sind dies die drei Grundfarben, welche Thomas Young als solche vorgeschlagen hat. Weniger gut würde Roth, Grün und Blau passen; das gemischte Violett würde bei dieser Auswahl schlechter werden, als das gemischte Blau bei der ersteren. Die gewöhnlich gewählten drei Grundfarben Roth, Gelb und Blau sind aber durchaus unzureichend, weil man aus ihnen nimmermehr Grün erzeugen kann.

Wir werden demnach auch die Lehre von den drei Grundfarben, als den drei Grundqualitäten der Empfindung, wie sie Thomas Young aufgestellt hat, fallen lassen müssen. Entstände die Empfindung des Gelb durch die gelben Strahlen des Spectrums nur deshalb, weil dadurch gleichzeitig die Empfindung des Roth und Grün angeregt würde, und beide zusammenwirkend Gelb gäben, so müsste genau dieselbe Empfindung auch durch eine gleichzeitige Einwirkung der rothen und grünen Strahlen erregt werden können; indessen wird durch die letzteren niemals ein so glänzendes und lebhaftes Gelb erzeugt, wie es die gelben Strahlen geben. Ebenso ist es mit dem Blau, welches aus Grün und Violett, oder dem Violett, welches aus Blau und Roth zu mischen wäre. Um in diesem Sinne die Lehre von den Grundfarben festzuhalten, müsste man mindestens fünf solche hinstellen. Dagegen würden

Digitized by Google

drei Grundfarben wohl genügen, um in dem Sinne von Lambert und Forbes die matten und verhältnissmässig unreinen Farben der Naturkörper wiederzugeben und zu classificiren. Nur würde es für eine sichere, wissenschaftliche Classification doch nöthig werden, eine andere Methode für die Zusammensetzung der Farben zu gebrauchen, als die Mischung der Pigmente.

Bei der Vereinigung von je zwei einfachen Farben treten uns zwei neue Farbeneindrücke entgegen, nämlich Weiss und und Purpurroth, mit ihren Uebergangsstufen in die vorher genannten einfachen Farben. Das Purpurroth gehört zu den gesättigten Farben, welches nicht anders als aus dem äussersten Roth und Violett dargestellt werden kann, ohne an seinem Glanze zu verlieren. Das Weiss dagegen kann auf unendlich verschiedene Weise dargestellt werden, ohne dass das Auge ein Weiss von dem andern zu unterscheiden vermöchte. Wir erhalten es z. B. aus einfachem Gelb und Blau, aus einfachem Roth, Grün und Violett, oder aus diesen fünf einfachen Farben zusammengenommen; und ausserdem aus den mannichfaltigsten complicirteren Combinationen. Es wird deshalb als indifferentes Licht den Gegensätzen der Farben gegenübergestellt. Die übrigen Combinationen je zweier einfacher Farben erscheinen dem Auge als Uebergänge der einfachen Farben und des Purpur in Weiss, aber sie verhalten sich doch in weiteren Zusammensetzungen, wie oben angeführt ist, wesentlich anders als es die Spectralfarben durch hinzugefügtes weisses Licht abgeschwächt thun würden.

Zum Schluss gebe ich folgende kleine Tabelle zur Uebersicht über die Combinationen je zweier Farben, bei welcher ich die fünf Farben zu Grunde lege, durch deren Vereinigung die Farben des Spectrum genügend gut wiedergegeben werden können. In der ersten Horizontal- und ersten Verticalreihe stehen die einfachen Farben, welche vereinigt worden sind; die daraus zusammengesetzten Farben finden sich, wo sich die betreffende Horizontal- und Verticalreihe schneiden.

***

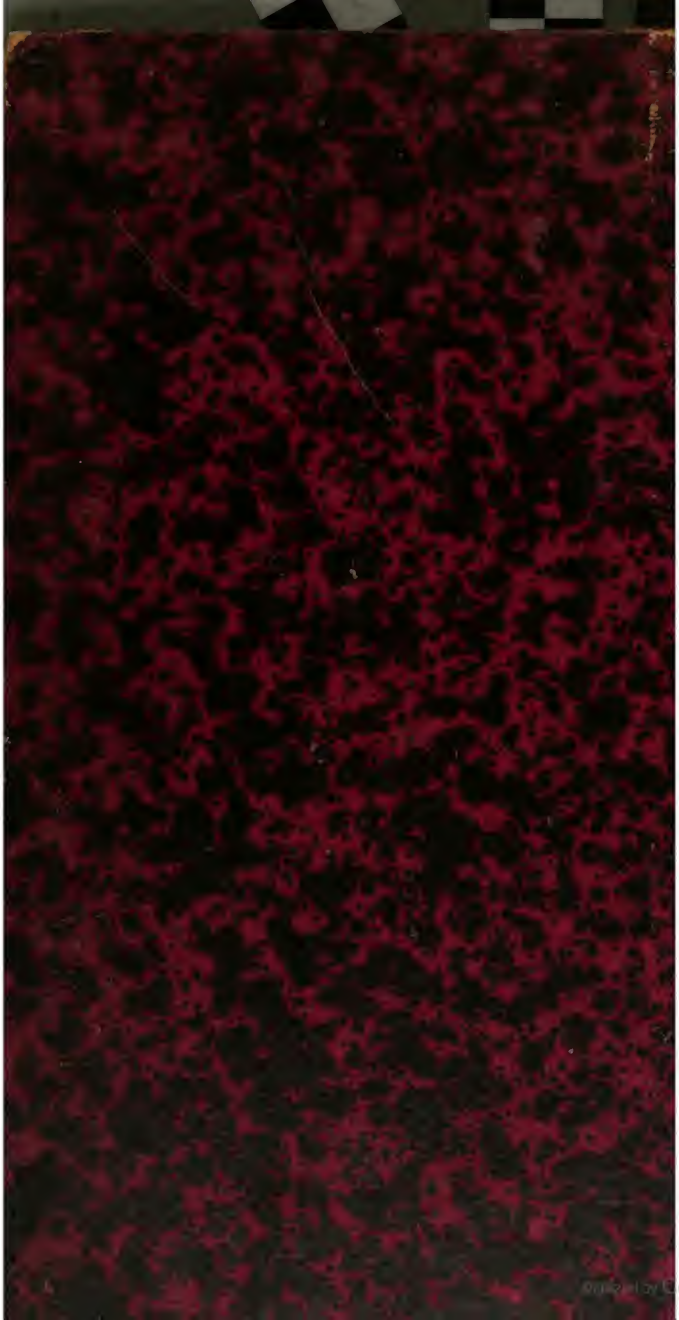
Digitized by Google

	Violett	Blau	Grün	Gelb	Roth
Roth	Purpur	Rosa	Mattgelb	Orange	Roth
Gelb	Rosa	Weiss	Gelbgrün	Gelb	
Grün	Blassblau	Blaugrün	Grün		
Blau	Indigblau	Blau			
Violett	Violett				

Digitized by Google

3 2044 106 192 297

Digitized by Google


Digitized by Google